

OSCILACIJE VODE U AKUMULACIJAMA PROUZROKOVANE PROMENAMA UZVODNOG I NIZVODNOG GRANIČNOG PROTICAJA

Nenad STEFANOVIĆ, Radomir KAPOR
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

U radu su prikazani rezultati numeričke simulacije neustaljenog tečenja u akumulaciji između hidroelektrana "Višegrad" i "Bajina Bašta". Za kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela poslužile su izmerene promene nivoa vode u akumulaciji. Numerički model je poslužio za simuliranje različitih događaja, koji su od uticaja na oscilovanje vode u akumulaciji. Na osnovu više eksperimenata određeni su uslovi koji izazivaju najveće oscilacije vode u akumulaciji.

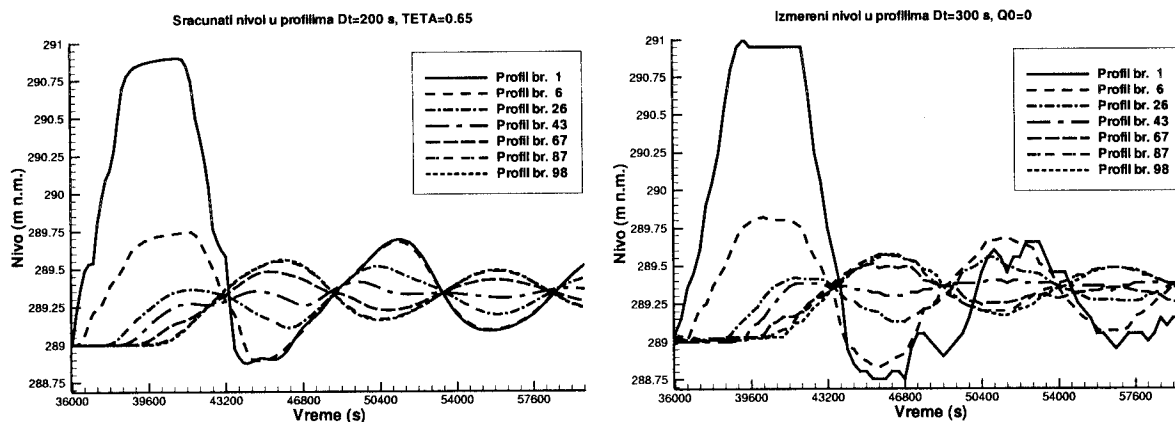
Ključne reči: otvoreni tokovi, neustaljeno tečenje, akumulacija, hidroelektrana.

1. UVOD

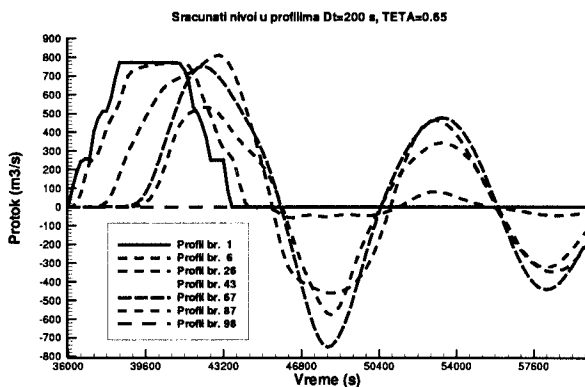
Oscilacije nivoa vode, izmerene u profilu neposredno uzvodno od brane u akumulacionom jezeru H. E. "Bajina Bašta", ukazale su na postojanje neustaljenog tečenja u akumulaciji, koje je prouzrokovano promenama proticaja na uzvodnoj i nizvodnoj elektrani. Ta pojava je pripisana prostiranju talasa duž akumulacije i njegovom odbijanju od uzvodne i nizvodne granice akumulacije. Zbog velikih površina poprečnih preseka vode u koritu akumulacije, brzine

tečenja su relativno male, tako da gubici mehaničke energije nisu dovoljni da brzo priguše oscilovanje vodene mase. Zbog toga dolazi do naizmenične transformacije kinetičke energije toka u potencijalnu i obrnuto, što se manifestuje oscilovanjem vodene mase.

Da bi se ova pojava ispitala i objasnila, 1990. godine su izvršena merenja na akumulacionom jezeru H. E. "Bajina Bašta". Granični uslovi su zadati hidrogramima na oba hidroenergetska postrojenja, a početni su bili mirovanje vodene mase. Mereni su nivoi kroz vreme na odabranim profilima. Merenja su jasno pokazala da oscilacije postoje i da su značajne (slike 1. i 2.). Napravljen je numerički model neustaljenog tečenja ([2] i [4]), a potom kalibrisan i verifikovan izmerenim podacima. Rezultati numeričke simulacije vrlo dobro su se slagali sa osmotrenim podacima. Upotrebljivost ovako kalibrisanog modela može biti velika. To je snažna alatka za eksperimentisanje u cilju upoznavanja zakona kretanja vodene mase u basenu u različitim okolnostima, i iznalaženje rešenja u upravljanju rada dve hidroelektrane. Mogu se, bez velikih teškoća i materijalnih ulaganja, u vremenu daleko kraćem nego u prirodi, ispitati uticaji raznih parametara na neustaljeno tečenje vodene mase u akumulacionom basenu.



Slika 1. Izmereni i sračunati nivoi u akumulaciji po nailasku uzvodnog talasa.

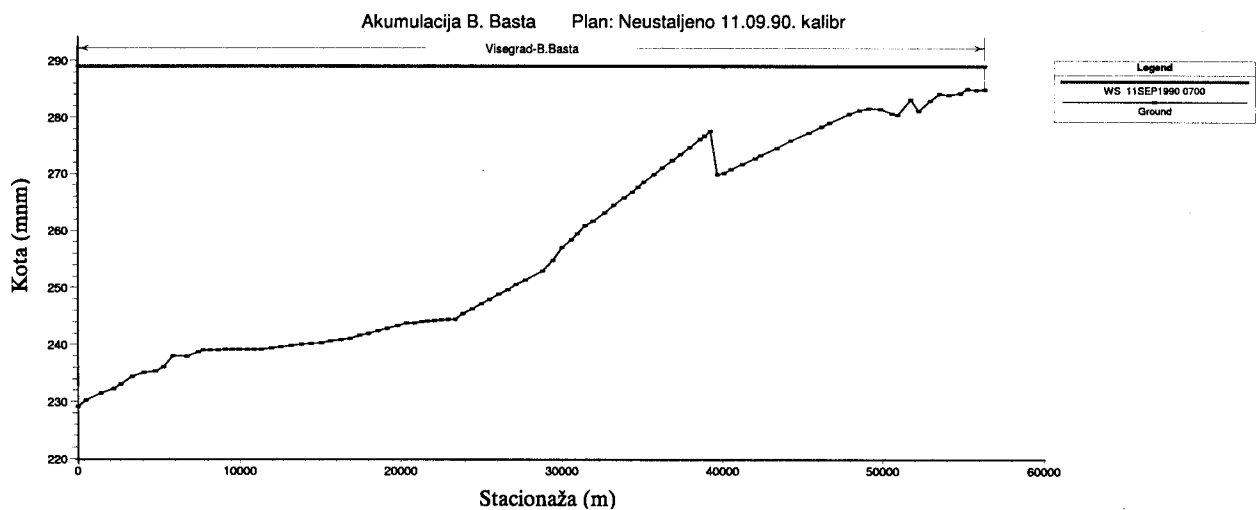


Slika 2. Sračunati proticaji u akumulaciji po nailasku uzvodnog talasa.

Negativnim efektima oscilovanja izložena su obe elektrane. Na H. E. "Bajina Bašta" nije dozvoljeno

prelivanje preko segmentnih ustava iz tehničkih razloga, zbog čega nivo vode u akumulaciji mora biti za pola amplitude maksimalne oscilacije niži od najviše dozvoljene kote. Pošto oscilacije nivoa mogu da budu oko 1 m, sa instalisanim proticajem kroz turbine od $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, smanjuje se snaga za oko 2.5 MW. Sa stanovišta H. E. "Višegrad", oscilacije donje vode takođe dovode do promene snage na turbinama (menja se raspoloživi pad). Zbog malih dubina akumulacije u profilu H. E. "Višegrad" (slika 3.), ove promene mogu biti i veće nego na nizvodnom kraju (isti proticaj zahteva veće dubine i nagibe slobodne površine vode).

U radu su prikazani neki generalni zaključci, primenljivi na sve akumulacije sličnih dispozicija. Analizirani su uticaji vremenskog koraka i nivoa vode na profilu uz nizvodnu akumulaciju, na oscilacije. Ispitana je i superpozicija talasa u akumulaciji, odnosno pojava rezonance.



Slika 3. Prikaz podužnog preseka kroz jezero H.E. "Bajina Bašta" sa kotom vode 289 m n.m.

2. MATEMATIČKI I NUMERIČKI MODEL

Matematički model neustaljenog tečenja u otvorenom toku čine jednačine Sen Venana, jednačina održanja mase:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

i jednačina održanja količine kretanja:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{(AR^{2/3})^2} \right) = 0 \quad (2)$$

gde su: x rastojanje, t vreme, Z kota nivoa vode, Q proticaj vode, V brzina tečenja vode, A površina poprečnog preseka, n hidraulička hrapavost, R hidraulički radijus, B širina vodnog ogledala i g ubrzanje zemljine teže.

Numerički model, kojim se rešavaju parcijalne diferencijalne jednačine, koristi implicitnu metodu sa "četiri tačke" (Prajzmanova metoda). Vrednost bilo koje funkcije $F(x, t)$ definiše se kao:

$$F(x, t) \approx \Theta \frac{F_i^{j+1} + F_{i+1}^{j+1}}{2} + (1 - \Theta) \frac{F_i^j + F_{i+1}^j}{2} \quad (3)$$

dok se parcijalni izvodi po vremenu i rastojanju zamenjuju konačnim razlikama:

$$\frac{\partial F}{\partial t} \approx \left(\frac{F_i^{j+1} + F_{i+1}^{j+1}}{2} - \frac{F_i^j + F_{i+1}^j}{2} \right) \div \Delta t \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \left(\Theta \frac{F_{i+1}^{j+1} - F_i^{j+1}}{\Delta x_i} - (1 - \Theta) \frac{F_{i+1}^j - F_i^j}{\Delta x_i} \right) \quad (5)$$

gde su: i indeks rastojanja, j indeks poznatog vremena, $j + 1$ indeks nepoznatog vremena i Θ koeficijent pondetracije ($0.5 < \Theta < 1.0$).

Početni uslov u akumulaciji je određen kotom nivoa gornje vode kod H. E. "Bajina Bašta" od 289 m n. m. i početnim proticajem duž akumulacije $Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{s}$. Neustaljeno tečenje nastaje kada sa uzvodne i nizvodne strane počnu da deluju granični uslovi - zadati hidrogrami, koji se mogu videti na slici 2. Glavni talas je izazvan ispuštanjem vode u akumulaciju iz H. E. "Višegrad" (profil 1), po zadatom hidrogramu. Početni proticaj je $0 \text{ m}^3/\text{s}$, a maksimalani proticaj ima vrednost od $771 \text{ m}^3/\text{s}$, u trajanju od 47 minuta, sa uzlaznom i silaznom granom u trajanju od po 39 minuta. Na nizvodnom kraju akumulacije, u profilu 98, ukupan proticaj je jednak 0, jer je proticaj hidroelektrane "Bajina Bašta" sve vreme bio jednak proticaju koji je u jezero ispuštala reverzibilna hidroelektrana.

Akumulacioni basen je dugačak oko $L \approx 56 \text{ km}$, a poprečni preseći za diskretizaciju geometrije su na oko 600 m. Za simulaciju je korišćeno 98 poprečnih profila. Hidraulička hrapavost je određena kalibrisanjem modela sa merenjima.

3. UTICAJ VREMENSKOG KORAKA NA REZULTATE PRORAČUNA

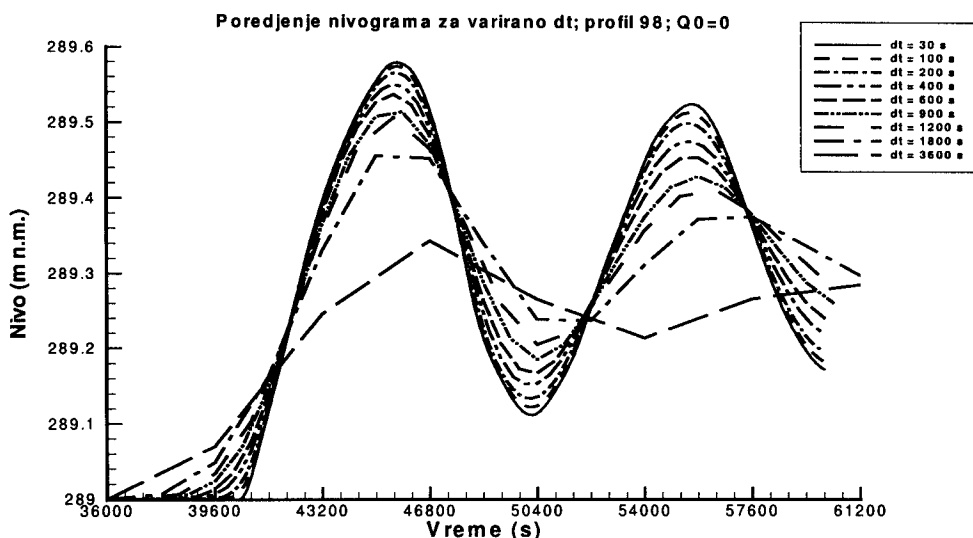
Izbor vremenskog koraka, kao parametra modela, je izuzetno značajan za numeriču simulaciju. Iako je problem vremenskog trajanja proračuna, zbog manjih vremenskih koraka, prevaziđen razvojem računarskih procesora i njihovom velikom brzinom obrade podataka, i dalje postoji težnja da se sa što većim vremenskim priraštajem proračun obavi što pre. Sa druge strane, rešenja numeričke simulacije dobijena većim vremenskim korakom od preporučenog, mogu dati lažnu sliku o simuliranom fenomenu, odnosno,

približno rešenje parcijalnih diferencijalnih jednačina sa značajnom greškom.

Veličine Δx_i i Δt , kao i koeficijent ponderacije Θ , se kao parametri unose u model. Rastojanje između profila Δx_i ($i = 1, n - 1$; n - broj profila) zavise od geometrije akumulacije i načina prostorne diskretizacije. Sa praktične strane dužinski korak treba da bude što veći da bi se smanjilo merenje na terenu, a sa računске strane nije dobro ako su rastojanja između profila prevelika ([1] i [3]). Ne ulazeći u problematiku izbora dužinskog koraka, posvetiće se pažnja vremenskom priraštaju Δt za poznate Δx_i .

Kurantov broj ($Cr = c \frac{\Delta x}{\Delta t}$; $c = \sqrt{g \cdot h}$; c - brzina

prostiranja talasa) je bezdimenzionalni pokazatelj stabilnosti metode. Kod eksplicitnih računskih šema uslov za stabilnost je da ovaj broj bude manji od jedinice. Kod implicitnih, kao što je Praismanova metoda četiri tačke, vrednost ovog broja može da se kreće čak i do 100, u zavisnosti od talasne dužine oscilacije koja je interesantna za razmatranje. Ovako velikim vrednostima Kurantovog broja odgovaraju veliki vremenski koraci, ali treba biti obazriv: neke manje talasne dužine mogu da budu prigušene računskom metodom i da se ne dobije odgovarajuća tačnost u proračunu ([1] i [3]). Može da se desi, da je talas nekog kraćeg perioda oscilovanja relevantan za neke promene nivoa, a numerička šema može da ga priguši i umanju njegov uticaj, ili da ga prevelikim korakom jednostavno preskoči. Isto tako ne treba uzimati ni previše male vremenske korake (ne preporučuje se da $Cr < 1$). Prema dosadašnjem iskustvu najbolje rezultate daju vremenski koraci za koje se Kurantov broj kreće u rasponu $1 < Cr < 10$. Ako postoji mogućnost kalibracije, parametre t i θ treba odrediti tim postupkom. Pošto postupak kalibracije podrazumeva "podešavanje" proračuna, tako da se rezultati što manje razlikuju od vrednosti osmotrenih u prirodi, to se može promenom vremenskog koraka postići da se na modelu amplitude talasa određenih talasnih dužina (koje se smatraju za relevantne) što bolje slažu sa izmerenim u prirodi. I dokle god se računa sa talasima sličnih dužina, treba koristiti vrednosti za koje je kalibracija dala najbolje slaganje. Za uslove tečenja u akumulaciji H. E. "Bajina Bašta" kalibracijom su dobijene vrednosti $\theta = 0.65$ i $\Delta t = 200 \text{ s}$ ([2] i [4]). Za ove vrednosti parametara su dobijena najbolja slaganja sa osmotrenim vrednostima, a rezultati proračuna su prikazani na slikama 1. i 2.

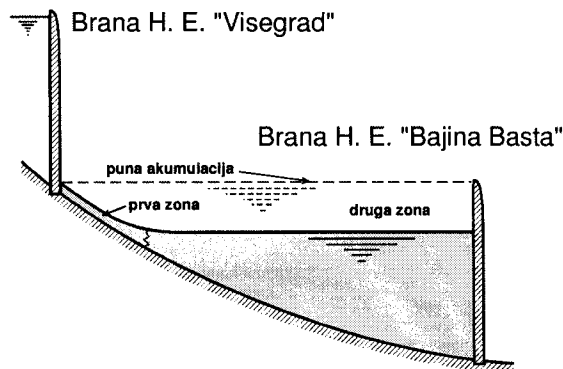


Slika 4. Poređenje rezultata proračuna neustaljenog tečenja za profil 98, za različito Δt .

Na slici 4. prikazani su rezultati proračuna za različito Δt i konstantno $\theta = 0.65$. Zbog preglednosti prikazane su promene nivoa kroz vreme, samo za profil uzvodno od brane H. E. "Bajina Bašta". Sa grafika se jasno vidi da se za manji vremenski korak od 200 s povećavaju amplitude svih oscilacija i da se pojavljuju i neki talasi manje talasne dužine, superponirani sa glavnim talasom (najveće talasne dužine). Ovi talasi su posledica lokalnog fenomena koji nastaje u plićem delu akumulacije, kada se glavni talas odbije od uzvodne granice i javi dopunska oscilacija, zbog porasta dubine nizvodno. Sa povećavanjem vremenskog koraka dolazi do smanjivanja svih amplituda i do "preskakanja" nekih bitnih tačaka u vremenu, što dovodi do potpuno pogrešne slike o tome šta će se dogoditi u akumulaciji (slika 4.).

4. UTICAJ KOTE NIVOVA KOD H. E. "BAJINA BAŠTA" NA OSCILACIJE U AKUMULACIJI

Sledeći niz eksperimenata treba da da odgovore na pitanje kakav bi uticaj na oscilacije vodene mase imalo spuštanje nivoa kod H. E. "Bajina Bašta". Da ne bi uzvodni delovi akumulacije, uz H. E. "Višegrad", pri spuštanju nivoa ostali na suvom, početni uslov je izmenjen - usvojeno je da je početni proticaj u akumulaciji $Q_0 = 50 \text{ m}^3/\text{s}$. Za ovaj proticaj i nižu nizvodnu kotu u akumulaciji nastaju dve zone (slika 5). U *prvoj zoni*, u uzvodnim delovima se formira deo sa tokom koji ima značajne brzine, gubitke na trenje i liniju nivoa sa podužnim padom, a u *drugoj zoni*, u dubljim delovima akumulacije, brzine su male sa skoro horizontalnom linijom nivoa.



Slika 5. Formiranje dve zone toka za kote vode niže od kote maksimalnog uspora u profilu brane Bajina Bašta

U numeričkim eksperimentima upušan je talas, po već opisanom zadatom hidrogramu, čiji je bazni proticaj povećan na $Q_0 = 50 \text{ m}^3/\text{s}$. Varirane su kote u najnižvodnijem profilu, koje su početni uslov. Prikazane su varijante rezultata proračuna sa početnim kotama gornje vode na H. E. "Bajina Bašta" 286.5, 284, 281.5, 279 i 270 m n. m (slike 5.). Dat je i prikaz kako se ponašaju nivoi vode u akumulaciji, za slučaj generisanja poremećaja na nizvodnom kraju akumulacije, ispuštanjem vode kod H. E. "Bajina Bašta", po istom hidrogramu kao za uzvodni kraj, za sniženu početnu kotu vode kod brane 284 m n. m. (slika 6.).

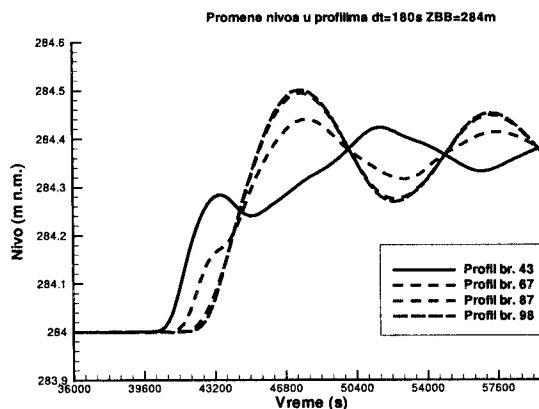
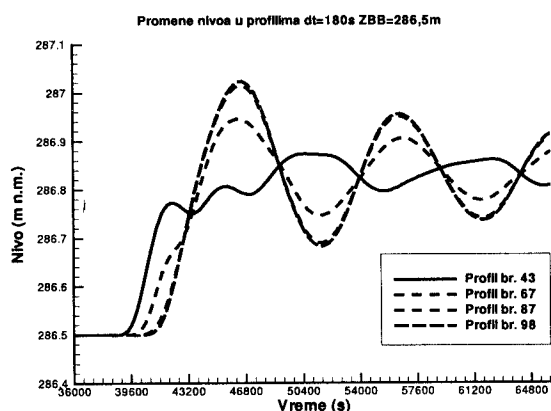
Da bi bili jasniji rezultati proračuna, napraviće se kratak osvrt na fiziku zbivanja. U prvoj zoni akumulacije su relativno male dubine, a velike brzine i trenje, pa se nailazeći talas iz H. E. "Višegrad", zbog male brzine prostiranja talasa ($c = \sqrt{g \cdot h}$), rasplinjava i kao ublažen ulazi u drugu zonu, sa većim dubinama i većim brzinama prostiranja talasa poremećaja. Rasplinuti talas će u drugoj zoni izazvati oscilovanje, ali će oscilacije biti blaže od oscilacija koje bi nastale da nema prve zone. Što je dužina prve zone veća (niža početna kota kod H. E. "Bajina Bašta") to su i oscilacije blaže. U prvoj zoni oscilacije su potpuno zanemarljive, zbog velikog trenja koje ih prigušuje, tako da se oscilacije dešavaju samo u drugoj zoni.

Pri snižavanju kote gornje vode u akumulaciji, perioda oscilovanja talasa u drugoj zoni se, sa jedne strane smanjuje u poređenju sa punom akumulacijom (zbog manje dužine), a sa druge povećava zbog manje brzine

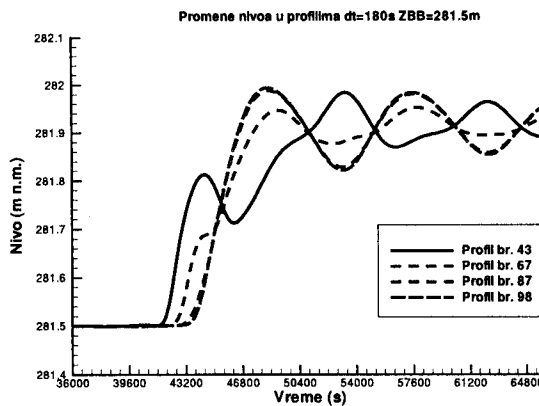
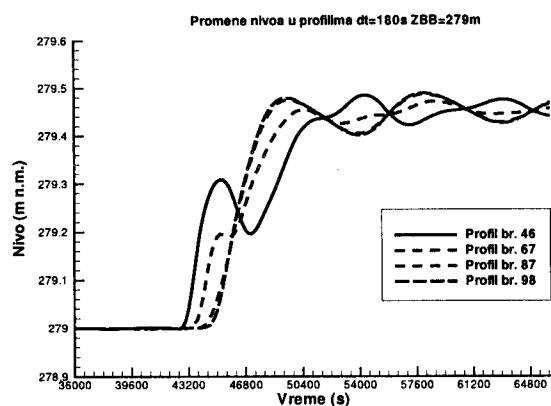
prostiranja talasa (zbog manje dubine). Tako se perioda oscilovanja talasa u drugoj zoni ne razlikuje mnogo od periode oscilovanja za punu akumulaciju. To se sasvim jasno vidi i na graficima (slike 5.).

Pri prostiranju talasa kroz akumulaciju javlja se još jedan fenomen. Pošto postoje dve zone, sa značajno različitim srednjim brzinama prostiranja talasa i gubicima na trenje, javiće se i delimično odbijanje talasa pri prelasku iz zone u zonu. Na prelazu odbijeni talas će biti dodatno rasplinut, a to sve vodi ka prigušivanju odbijenih talasa.

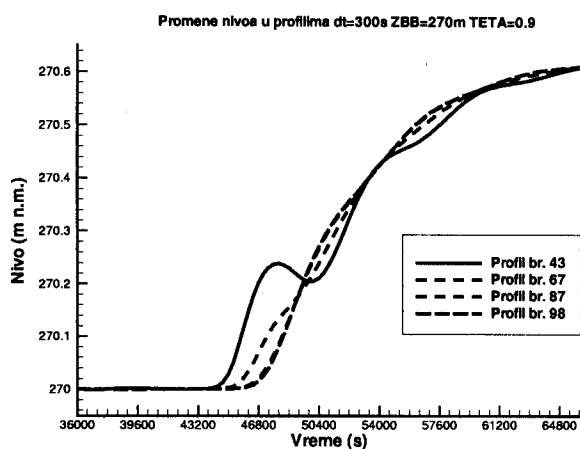
Iz prikazanih eksperimenata se može zaključiti da najviše osciluje puna akumulacija, odnosno tok sa velikim dubinama i malim brzinama kretanja vode. Tada su brzine prostiranja talasa velike, a mala je sila koja može da priguši oscilacije vodene mase.



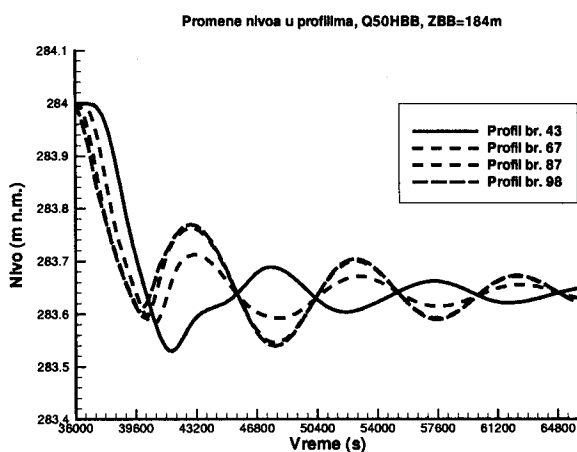
Slika 5-a. Promene nivoa na profilima *druge* zone, za početne vrednosti kota vode najnižvodnijeg profila (profil brane "Bajina Bašta") 286.5 m n. m. i 284.0 m n. m.



Slika 5-b. Promene nivoa na profilima *druge* zone, za početne vrednosti kota vode najnižvodnijeg profila (profil brane "Bajina Bašta") 281.5 m n. m. i 279.0 m n. m.



Slika 5-c. Promene nivoa na profilima *druge* zone, za početnu vrednost kote vode najnižvodnijeg profila (profil brane "Bajina Bašta") 270.0 m n. m.



Slika 6. Promene nivoa na profilima *druge* zone, za početnu vrednost kote vode najnižvodnijeg profila (profil brane "Bajina Bašta") 284.0 m n.m. Ovde su oscilacije izazvane hidrogramom na nizvodnom kraju akumulacije.

5. SUPERPOZICIJA OSCILACIJA I REZONANCA

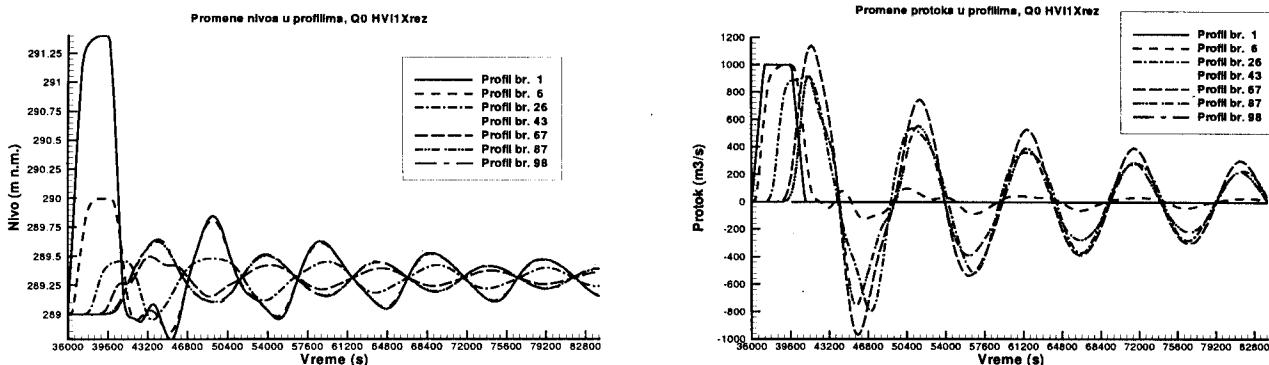
Režimi rada hidroelektrana, kao i način i vreme ispuštanja vode iz akumulacije kroz temeljne ispuste, prelive ili neke druge evakuacione objekte, imaju velikog uticaja na oscilacije zbog pojave superpozicije talasa u akumulaciji. Svaki novi talas, koji se upušta u akumulaciju u kojoj voda već osciluje, propagiraće se

kroz nju i sabiraće se sa talasima koji već postoje. U zavisnosti od intenziteta poremećaja i vremena kada su oni uneti, u akumulaciji će se stvarati talasi različitih talasnih dužina. Zbog difuzije talasa, kao i zbog različite brzine prostiranja duž akumulacije, talas će se raspliniti i njegova talasna dužina će tokom vremena postati jednaka dvostrukoj dužini akumulacije ($2L$), odnosno frekvencija oscilovanja postaće jednaka sopstvenoj učestanosti akumulacije. To će se desiti sa talasom svake talasne dužine. Zato su od najvećeg interesa za razmatranje talasi čija je talasna dužina jednaka $2L$. Za akumulaciju H. E. "Bajina Bašta" perioda oscilovanja je određena na osnovu eksperimenta i iznosi $T = 9890$ s (2 h 45 min).

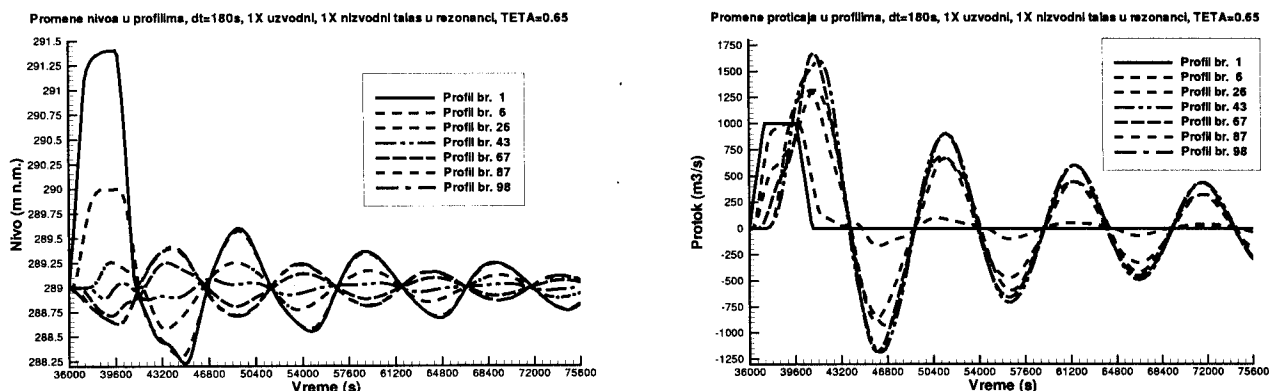
Naročitu pažnju treba posvetiti rezonanci talasa, zbog koje se mogu pojaviti talasi velikih amplituda. Najveću opasnost čine hidrogrami čija je dužina trajanja $(2n-1) \cdot \frac{T}{2}$; ($n = 1, 2, 3, \dots$), koji su u fazi sa postojećim talasom u jezeru. Ovakva pobuda najviše "zaljulja" vodenu masu basena. Isto tako može se desiti da se istovremeno i uzvodno i nizvodno u akumulaciji generiše talas sa trajanjem $(2n-1) \cdot \frac{T}{2}$; ($n = 1, 2, 3, \dots$) i

još da bude u fazi sa postojećim talasima u akumulaciji, što su najpovoljniji uslovi za oscilovanje. Može se nekoliko puta ponoviti uzvodni ili nizvodni talas, ili i jedan i drugi. Svaki takav manevar može još dodatno da zaljulja vodu i napravi oscilacije, koje za slučaj H. E. "Bajina Bašta" mogu dostići amplitudu i do 1 m kod same brane, a nizvodno od H. E. "Višegrad" i do 2 m za normalne uslove rada (slike 7).

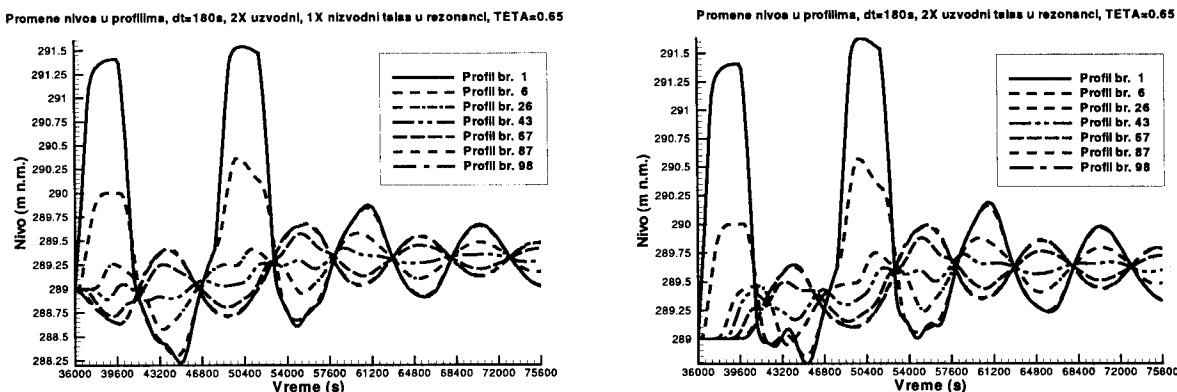
Ako se u akumulaciji, ulaznim ili izlaznim hidrogramom, generiše talas istog trajanja $(2n-1) \cdot \frac{T}{2}$; ($n = 1, 2, 3, \dots$), ali u suprotnoj fazi od postojećeg talasa u akumulaciji, talasi će se poništiti. Prikazan je primer oscilacija u akumulaciji, koje su posledice jednakog uzvodnog i nizvodnog hidrograma, koji su u suprotnim fazama (slika 8-a). Talasi su se poništili i gotovo da su nestale oscilacije u jezeru. Svi eksperimenti su izvođeni sa istim uzvodnim hidrogramima: maksimalan proticaj od $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ u trajanju od 42 minuta, sa uzlaznom i silaznom granom u trajanju od po 20 minuta. Maksimalni proticaj u ovim hidrogramima je veći od onih koji se mogu ostvariti na hidroelektranama, ali je u numeričkim eksperimentima usvojen da bi se ispitala pojava rezonance.



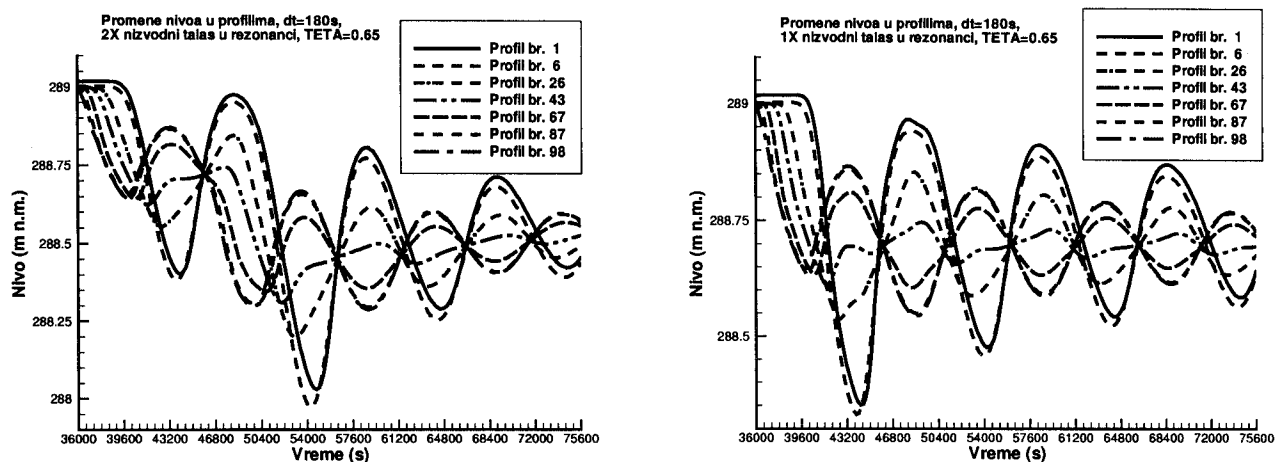
Slika 7-a. Na graficima su prikazne promene nivoa i proticaja, u relevantnim profilima akumulacije, nastale uzvodnim hidrogramom. Trajanje hidrograma je jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije (T). Takav talas je u rezonanci sa akumulacijom.



Slika 7-b. Na graficima su prikazne promene nivoa i proticaja, u relevantnim profilima akumulacije, izazvane uzvodnim i nizvodnim hidrogramima, čije je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Takavi talasi su u rezonanci sa akumulacijom. Istovremeno se upušta uzvodno i ispušta nizvodno isti talas (na ovaj način se postiže da su u istoj fazi) - ovaj manevar dovodi do velikih oscilacija vode.



Slika 7-c. Na graficima su prikazne promene nivoa, u relevantnim profilima akumulacije, nastale upuštanjem i ispuštanjem talasa (zadatog hidrogramom), čije je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Takavi talasi su u rezonanci sa akumulacijom. Gore: dva puta upušten talas uzvodno, tako da se drugi superponira sa prvim (u istoj su fazi); Dole: isto kao gore + istovremeno se sa prvim talasom upušta uzvodno talas istog hidrograma (na ovaj način se čini da su u istoj fazi).



Slika 7-d. Na graficima su prikazne promene nivoa, u relevantnim profilima akumulacije, nastale ispuštanjem talasa sa najnižvodnijeg profila, trajanja jednakog polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Oni su u rezonanci sa akumulacijom. Gore: ispušta se talas nizvodno; Dole: dva puta ispušten talas nizvodno, tako da se drugi superponira sa prvim (u istoj su fazi).

Izvedena su i dva eksperimenta za situacije kada talasi nisu ni u istoj ni u suprotnoj fazi, već im je fazni pomak u vremenskom domenu $T/4$, odnosno $3T/4$, što je prikazano na slikama (8-b i 8-c). Oscilacije nivoa su zaostale u akumulaciji i značajne su, a proticaji u pojedinim profilima se bitno razlikuju za ova dva slučaja. Ovi rezultati, grubo govoreći, odgovaraju nekoj situaciji između pomenuta dva ekstremna slučaja (kada su talasi u istoj ili suprotnoj fazi), baš kao što su im i fazni pomaci.

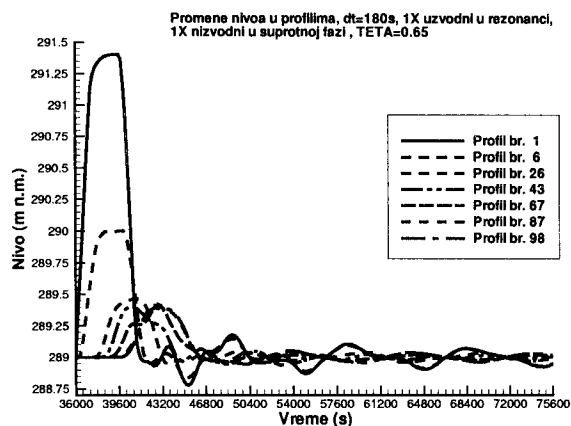
Može se izvesti zaključak da je za oscilacije masa vode u akumulacionom basenu važno trajanje i vreme pojave promena na graničnim hidrogramima i prethodno oscilovanje u akumulaciji. Opšta preporuka za ublažavanje oscilacija je da je najpovoljniji momenat za ispuštanje vode na nizvodnom profilu, u trenutku kada je nivo u jezeru, na tom profilu, u ravnotežnom položaju sa tendencijom porasta. Sa aspekta oscilacija najnepovoljniji momenat (povećava oscilovanje) je kada je nivo u ravnotežnom položaju, sa tendencijom kretanja na niže. Najnepovoljniji momenat za upuštanje vode u akumulaciju iz R. H. E. "Bajina Bašta" je kada je u najnižvodnijem profilu nivo u jezeru u ravnotežnom položaju sa tendencijom da se penje, a najpovoljniji je isto za ravnotežni položaj, samo kada nivo ima tendenciju da opada. Za neke preciznije analize treba definisati i hidrograme.

Postavlja se pitanje šta bi se desilo za ekscenno velike hidrograme sa nepovoljnom dužinom trajanja. Na primer uzvodno se upušta hidrogram trajanja $T/2$ sa vršnim proticajem od $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ (proticaj koji približno odgovara maksimalnim mogućnostima evakulacionih objekata HE), a istovremeno se ispušta jednak hidrogramom nizvodno (slika 9.). Na sreću, akumulacije su takve morfologije da se "same štite" od velikih amplituda. Na svom uzvodnom delu akumulacija ima relativno male dubine, koje rastu u nizvodnom smeru. Najveće su u zoni brane. Isto važi i za površine proticajnih profila. Znači, brzina prostiranja talasa nije u celoj akumulaciji ista, već raste od uzvodnih ka nizvodnim delovima jezera. Za ustaljeno tečenje brzine će biti najveće uzvodno, a kako se ide ka nizvodnim delovima biće sve manje, da bi minimum dostigle u zoni brane. Energetska linija će zato imati najveći gradijent (za oba smera toka pri oscilovanju u jezeru) u uzvodnom delu jezera, a najmanji u nizvodnom.

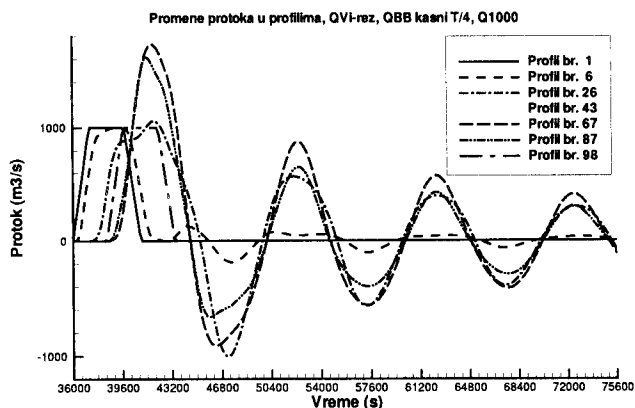
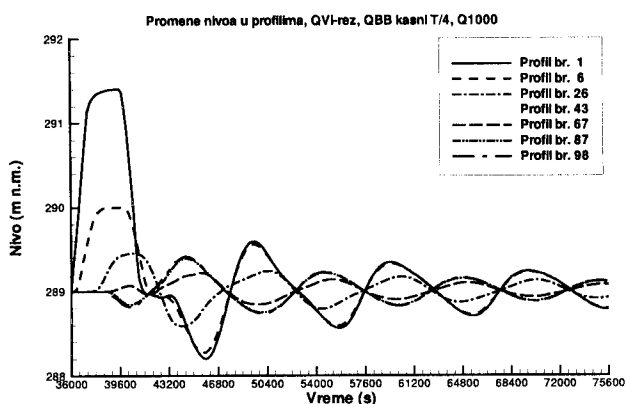
Isto tako, da bi se pokrenula voda na nekoj deonici u jezeru iz stanja mirovanja (horizontalan nivo), treba da se pojavi razlika piježometarskih kota na njenim krajevima. Da bi se ista masa vode protekla kroz celo jezero, ona mora u uzvodnim delovima da prođe većom brzinom, sa većim gubicima na trenje, a u nizvodnim manjom brzinom i sa manjim gubicima na trenje. Zato je za neku odabranu deonicu uzvodno u jezeru, potrebna veća razlika piježometarskih kota na njenim

krajevima, nego za neku nizvodnu deonicu. Na nizvodnoj odabranoj deonici proticajni profili su toliko veliki da i sasvim mala razlika pijezometarskih kota pokreće vodu do brzina, koje ne treba da budu velike da bi se ostvario veliki proticaj. Kada voda postigne odgovarajuću brzinu, razlika pijezometarskih kota uzvodno i nizvodno treba da se izjednači samo sa gubicima na trenje (koji su mali zbog malih brzina). Zbog toga će biti manji gradijenti i pijezometarske kote u nizvodnim delovima akumulacije, nego u uzvodnim.

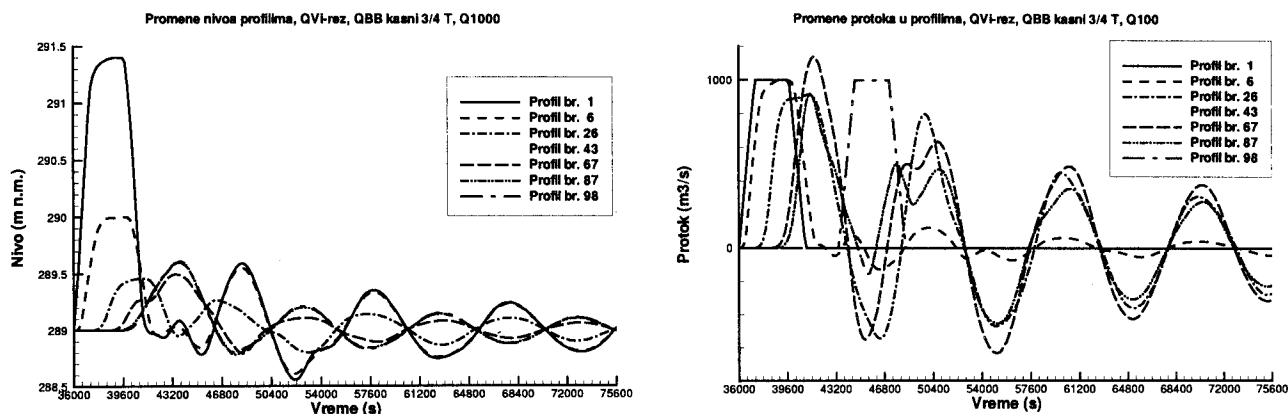
Ovaj fenomen ima kao posledicu dve pojave: *prva* je da uzvodni delovi akumulacije imaju ulogu prigušivača oscilacija i *druga* da će oscilacije biti sa većom amplitudom na uzvodnom kraju akumulacije. Drugi fenomen se objašnjava time da su zbog većih brzina uzvodno, veće su i kote do kojih će se popeti voda kada povratnim tokom pri nailasku na uzvodnu akumulaciju pretvori svoju kinetičku energiju u potencijalnu, i obrnuto za drugi smer tečenja. Prvi fenomen štiti akumulaciju od velikih oscilacija, jer ako je uzvodni hidrogram sa velikim vršnim proticajem, koji izaziva i znatno povećavanje nivoa, nastaću velike brzine vode i veliki gubici energije. Isto tako, što je veći proticaj, duži je i uzvodni deo akumulacije u kome je značajno trenje, pa akumulacija reaguje kao negativna povratna sprega (slika 9.). Taj mehanizam onda podseća na situaciju kada je snižena početna kota vode u akumulaciji i ono što je nazvano "*prva zona*".



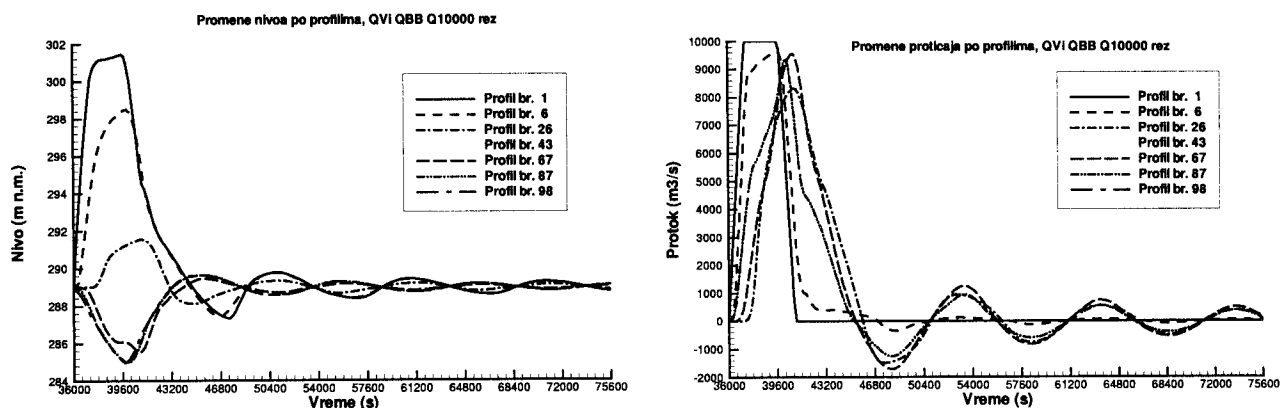
Slika 8-a. Grafik prikazuje promenu nivoa u relevantnim profilima akumulacije, nastalu upuštanjem talasa sa uzvodne strane akumulacije (profil H. E. "Višegrad"), takavog da mu je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Posle ($T/2$) od početka upuštanja ovog talasa, isti takav talas je ispušten sa najnižvodnijeg profila (profil H. E. "Bajina Bašta"). Na ovaj način je učinjeno da drugi talas bude u suprotnoj fazi od prvog. Talasi su se poništili (zaostale oscilacije u akumulaciji su male i potiču od odbijanja i difuzije talasa koji propagira kroz nepravilno korito).



Slika 8-b. Na graficima je prikazna promena nivoa i proticaja u relevantnim profilima akumulacije, nastalih upuštanjem i ispuštanjem talasa (zadatog hidrogramom), takavih da im je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Talasi su u rezonanci sa akumulacijom. Ispuštanje nizvodnog talasa kasni za upuštanjem ulaznog za ($T/4$). Ovakvi talasi nisu u fazi, a maksimalni proticaji i amplitude oscilacija su nešto manje - poređeno sa slučajem kada su ova dva talasa u fazi (slika 7.-b).



Slika 8-c. Na graficima je prikazna promena nivoa i proticaja u relevantnim profilima akumulacije, nastalih upuštanjem i ispuštanjem talasa (zadatog hidrogramom), takavih da im je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Talasi su u rezonanci sa akumulacijom. Ispuštanje nizvodnog talasa kasni za upuštanjem ulaznog za ($3/4 T$). Ovakvi talasi nisu u fazi, a maksimalni proticaji i amplitude oscilacija su nešto manje nego u predhodnom eksperimentu (slika 8.-b).



Slika 9. Na graficima je prikazna promena nivoa i proticaja u relevantnim profilima akumulacije, nastalih upuštanjem i ispuštanjem talasa (zadatog hidrogramom), takavih da im je trajanje jednako polovini sopstvene periode oscilovanja akumulacije ($T/2$). Talasi su u rezonanci sa akumulacijom. Ispuštanje nizvodnog talasa je sinhronizovano sa upuštanjem ulaznog. Ovakvi talasi su u fazi, a eksperiment se razlikuje od onog prikazanog na slici 7.-b utoliko što je vršni proticaj zadatog hidrograma ovde deset puta veći ($10000 \text{ m}^3/\text{s}$). Vidi se mehanizam "samozaštite" akumulacije od velikih oscilacija, o kome je bilo reči.

6. ZAKLJUČCI

Kalibrisanim numeričkim modelom može se simulirati neustaljeno tečenje u akumulacionom basenu između dve hidroelektrane. Intenzitet oscilovanja kota nivoa i brzina vode u akumulaciji zavisi od graničnih hidrograma, dubine vode u akumulaciji i prethodnih oscilovanja. U slučaju da su oscilacije vodene mase značajne, kao u slučaju hidroelektrana "Višegrad" i "Bajina Bašta", kotu vode u akumulaciji treba držati

polovinu amplitude talasa oscilacije ispod kote krune segmentne ustave, da bi se izbeglo prelivanje preko segmentnih ustava. Ovo dovodi i do nepotpune iskorisćenosti retenzionog prostora kao i do gubitaka u korisnom padu, koji direktno utiče na količinu proizvedene električne energije.

Zbog mogućih nepovoljnih posledica na rad hidroelektrana, numeričkim simulacijama treba odrediti načine rada elektrana koje treba izbegavati, ili

potpuno zabraniti. Ovakve hidrauličke analize treba uraditi kako za već izgrađene objekte, kod kojih se javljaju oscilacije masa, tako i za sve objekte koji se projektuju.

LITERATURA

- [1] Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A., (1980.), *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman Publishing Limited, London
- [2] Kapor, R., (1991.), *Studija propagacije talasa kroz akumulaciju H. E. "Bajina Bašta", izazvanih zajedničkim radom H. E. "Višegrad" i H. E. "Bajina Bašta"*, Institut za vodoprivredu "Jaroslav černi", Beograd
- [3] Mahmood, K., Yevjevich, V., (1975.), *Unsteady Flow in Open Channels*, Water Resources Publications, Fort Colins, Colorado
- [4] Muškatirović, J., Kapor, R., (1996.), *Water level oscillations in reservoir caused by upstream hydropower plant operation*, Hydraulic Engineering Software VI, Proceedings of Sixth International Conference on Hydraulic Engineering Software HYDROSOFT 96, Penang, Malaysia, str. 243-248, Computational Mechanics Publications, Southampton
- [5] Stefanović, N., Kapor, R., (2002.), *Oscilovanje nivoa vodenih masa u akumulacionim basenima*, Zbornik radova sa 13. savetovanje jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, strana II-55 II-63, Sokobanja

MASS OSCILLATIONS OF RESERVOIRS CAUSED BY UPSTREAM AND DOWNSTREAM BOUNDARY FLOW CONDITIONS

by

Nenad STEFANOVIĆ, Radomir KAPOR
Faculty of Civil Engineering

Summary

This paper presents results of numerical modelling of unsteady flow in reservoir between "Višegrad" and "Bajina Bašta" hydropower plants. The field data of water level oscillations were used for calibration of numerical model. The effects of different hydropower operation schedule on water oscillations in reservoir

were analyzed by numerical model. The conditions which induce the extreme water oscillations in reservoir, were determined.

Key words: open channel, unsteady flow, reservoir, hydropower plant

Redigovano 20.05.2003.